

회색 관계 이론과 실험계획을 이용한 Lance Tube Nozzle 최적화

Optimization of Lace Tube with Gray Theory and Design of Experiment

정 일 갑* · 이 동 명** · 이 상 범* · 임 진 택***
(*Ilkab Jeong · Dongmyung Lee · Sangbeom Lee · Jintaek Lim)

Abstract - As consumption of energy is increasing rapidly, energy saving is emphasized in nowadays. Thermal power plant occupies a large proportion in various type of power plant. Major causes of decreased power generation efficiency on thermal power stations is deposition of fly ash. Soot Blower is a facility to remove the ash which is deposited outside of tube by steam blowing on boiler. Residual stream which caused by lance tube in soot blower cannot be discharged steam effectively in lance tube causes reducing the thickness of lance tube. On the contrary, increasing discharge ratio of steam, lance tube cannot sustain proper pressure to remove ash on tube. This study suggests increasing discharge ratio of steam with proper pressure to remove ash on tube by optimization on shape of lance tube nozzle. To optimize shape of nozzle, discharge ratio and maximum blowing pressure on nozzle is selected as object functions. Diameter of nozzle, distance between nozzles, angle of nozzle and gap between nozzle is selected as design parameters. Then the design of experiment (DOE) with an orthogonal array is performed to analyze the effect of design parameters. And grey relational analysis and analysis of mean (ANOM) is performed to optimize shape of lance tube.

Key Words : Lance tube, Grey relational analysis, Design of experiment

1. 서 론

에너지 절약이 무엇보다 강조되는 요즘, 국내 에너지 수급에 있어 많은 부분을 차지하고 있는 화력 발전소의 열효율을 높이기 위한 다양한 방법들이 제안되고 있다. 발전용 석탄화력 보일러의 경우, 열교환 튜브에 점착(Deposition) 회분은 열교환 특성을 악화시켜 열효율을 저감시키며[1], 일반적으로 점착된 회분을 운전 중에 제거하기 위하여 제매기가 사용된다. 제매기는 용융상태의 회분에 의해 보일러 노내 벽튜브에 형성되는 슬래깅 및 고품 회분에 의해 재열기, 과열기 및 절탄기 등에 형성되는 파울링을 제거하기 위하여 보일러 열교환 튜브 전체에 걸쳐서 설치된다.[2] Sondreal et al[3]에 따르면 파울링이 심하게 발생하면 보일러 출력이 10~20% 떨어지고, 열효율이 10%까지 줄어드는 것으로 알려져 있다. 그래서 제매기를 주기적으로 운전하여 슬래깅 및 파울링으로 전열면에 점착된 회분을 제거한다. 이러한 회분의 제

거를 통해 발전 설비의 열효율을 높이고자 제매기에 대한 중요성이 강조되고 있는 상황이다. 제매기는 보일러 운전 중 Steam Blowing(스팀 세척)을 통해 Tube 외면의 회분을 제거하는 설비로 Steam이 효과적으로 배출되지 못해 잔류 습증기에 의해 Lance Tube의 두께가 감소되어 수명이 짧아지는 문제점이 있다. 하지만 Steam의 배출량을 늘리게 되면 배출되는 압력이 낮아져 회분을 적절하게 제거하기 힘들어지는 문제점 역시 존재한다.

본 연구에서는 Lance Tube Nozzle 형상의 최적화를 통해 최적의 배출량과 압력을 유지할 수 있도록 한다. 기존의 설계 파라미터를 이용한 최적화에는 실험 계획법에 따른 직교배열표를 구성하고 이 데이터를 토대로 최적화를 수행하였다. 하지만 직교배열표를 이용한 실험 계획은 전체 데이터가 아닌 일부 부족한 정보를 이용하여 최적화를 수행하게 된다. 뿐만 아니라 다목적 함수를 이용한 최적화는 더욱 어렵다는 문제점이 있다. 따라서 이러한 문제점을 보완하기 위해 본 연구에서는 다구치 실험 계획법과 회색 이론(Grey Theory)을 이용하여 Lance Tube Nozzle의 형상 최적화를 수행하고자 한다.

† Corresponding Author : Dept. of Shipbuilding & Marine Engineering, International University of Korea, Korea.
E-mail : lsb7766@gmail.com

* Dept. of Mechanical Engineering, Pusan National University, Korea.

** Mechanical Element Technology Center, Korea Testing Laboratory, Korea.

***Dept. of Electrical Energy Engineering, International University of Korea, Korea.

Received : February 25, 2016 ; Accepted : May 20, 2016

2. 회색 관계 이론

본 연구에서는 부족한 정보와 다목적 함수를 고려하기 위해 회색 관계 분석을 사용하였다. 회색이론(Grey Theory)은 정보가 전혀 없는 상태를 검은색으로 모든 정보가 있는 상태를 흰색으로 정의하고, 정보가 부족하거나 정확하게 결정되지 않은 경우의 상

태를 회색 상태라고 정의한다[4]. 회색이론에 따라 정보가 부족한 상태의 시스템을 회색 시스템이라고 정의할 수 있다. 회색 시스템과 회색 현상에 대한 주요 용어는 다음의 세 가지 용어가 있다. 첫 번째는 회색수(Grey Number)이고 시스템에서 부족한 정보의 수를 의미한다. 두 번째는 회색요소(Grey Element)이고 부족한 정보의 요소를 말한다. 마지막 세 번째 요소인 회색 관계(Grey Relation)는 부족한 정보들 사이의 관계를 말한다.

회색 이론의 가장 큰 장점은 부족한 정보와 명확하지 않은 문제에 대해 정도 높게 다룰 수 있으며, 특히 충분한 데이터가 없는 경우에도 분석도구로서 사용이 가능하다[4][5]. 회색 관계 분석으로 다목적 함수와 파라미터의 상관 정도를 얻을 수 있으며, Lin et al. [6]은 다구치 방법에서 다목적 문제를 풀기 위해 회색 관계 분석을 이용한 방법을 제안하였다. 다구치 실험 계획법을 이용한 그레이 상관 분석을 수행하는 순서는 다음의 7단계를 통해 수행된다[7].

Step 1: 실험 파라미터의 개수와 수준을 고려한 직교 배열표를 구성하고, 그에 따른 실험을 수행한다.

Step 2: 실험 결과를 목적 함수 별 손실 함수의 특성에 따른 S/N 비(Y_{ij})를 망대 특성의 경우 식 (1)에 따라 계산하고, 망소, 망목 특성의 경우에는 식 (2)와 같이 계산한다.

$$S/NRatio = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_{ij}^2} \right) \quad (1)$$

$$S/NRatio = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{ij}^2 \right) \quad (2)$$

Step 3: 데이터를 균등하게 분배하고 추가 분석을 위해 허용되는 범위로 크기를 조절하기 위해 Y_{ij} 를 손실 함수의 특성에 따라 식(3)~식(5)을 이용하여 Z_{ij} ($0 \leq Z_{ij} \leq 1$)로 정규화한다.

단, Z_{ij} : Normalized value for i th experiment/trial for j th dependant variable/response

1) 망대특성

$$Z_{ij} = \frac{Y_{ij} - \min(Y_{ij}, i=1, 2, \dots, n)}{\max(Y_{ij}, i=1, 2, \dots, n) - \min(Y_{ij}, i=1, 2, \dots, n)} \quad (3)$$

2) 망소특성

$$Z_{ij} = \frac{\max(Y_{ij}, i=1, 2, \dots, n)}{\max(Y_{ij}, i=1, 2, \dots, n) - \min(Y_{ij}, i=1, 2, \dots, n)} \quad (4)$$

3) 망목특성

$$Z_{ij} = \frac{|Y_{ij} - T| - \min(|Y_{ij} - T|, i=1, 2, \dots, n)}{\max(|Y_{ij} - T|, i=1, 2, \dots, n) - \min(|Y_{ij} - T|, i=1, 2, \dots, n)} \quad (5)$$

Step 4: 정규화된 S/N비로부터 회색 상관 계수(Grey Relational Coefficient, GC)를 계산한다.

$$GC_{ij} = \frac{\Delta_{\min} + \lambda \Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \lambda \Delta_{\max}} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, n - \text{Experiments} \\ j = 1, 2, \dots, m - \text{Responses} \end{cases} \quad (6)$$

단,

GC_{ij} : Grey relational coefficient for the i th experiment / trial and i th dependant variable / response

Δ_{ij} : Absolute difference between Y_{Oj} and Y_{ij} which is a deviation from target value and can be treated as quality loss

Y_{Oj} : Optimum performance value or the ideal normalized value of j th response

Y_{ij} : The i th normalized value of the j th response/ dependant variable

Δ_{\min} : Minimum value of Δ_{ij}

Δ_{\max} : Maximum value of Δ_{ij}

λ : The distinguishing coefficient which is defined in the range $0 \leq \lambda \leq 1$ (the value may be adjusted on the practical needs of the system)

Step 5 : 회색 관계 등급(Grey Relational Grade, G_i)를 식 (7)에 따라 계산한다.

$$G_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m GC_{ij} \quad (7)$$

Step 6: 회색 관계 등급을 기반으로 평균 분석이나 분산 분석을 이용하여 파라미터 별 최적 수준을 선정한다.

3. Lance Tube 형상 및 설계 파라미터 설정

설계 파라미터는 Lance Tube의 성능에 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상되는 다음 4개의 Nozzle과 관련된 인자를 표 1과 같이 설계 파라미터의 범위를 설정하였다. 그림 1은 파라미터의 정의를 나타낸 그림이다. Nozzle의 성능을 평가하는 지표로 투입유량과 토출유량의 비율인 유량비와 0.3 m 떨어진 곳에서의 최대 압력을 목적 함수로 선정하였다.

표 1 설계 파라미터의 범위

Table 1 Level of design parameters

Design Parameter	Unit	Level		
		1	2	3
Diameter	mm	28	34	40
Distance	mm	40	55	70
Angle	deg	2	4	6
Gap	mm	8	15	22

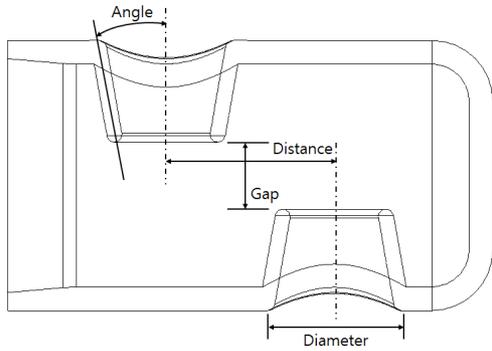


그림 1 설계 파라미터의 정의
 Fig. 1 Definition of design parameters

4. 실험 계획법에 따른 실험 계획 작성

앞서 선정된 설계 파라미터의 파라미터 분석을 위해 표 2와 같이 직교 배열표를 구성하였다. 표 2의 직교 배열표에 따라 Lance Tube 유동 해석을 수행하였으며, 유동 해석을 위한 Mesh statistics와 경계 조건은 "5. Lance Tube 유동 해석"의 조건에 따라 해석을 수행하였다.

표 2 직교 배열표
 Table 2 Orthogonal array table

	Diameter (mm)	Distance (mm)	Angle (deg)	Gap (mm)
CASE 1	28	40	2	8
CASE 2	28	55	4	15
CASE 3	28	70	6	22
CASE 4	34	40	4	22
CASE 5	34	55	6	8
CASE 6	34	70	2	15
CASE 7	40	40	6	15
CASE 8	40	55	2	22
CASE 9	40	70	4	8

5. Lance Tube의 유동 해석

Lance Tube의 유동 해석을 위해 그림 2와 같은 유동해석 모델을 생성하였다. 증기 투입구의 길이는 약 10m, Nozzle이 토출되는 방향의 길이는 1m로 설정하였다. 사용된 유체는 Steam을 사용하였으며, 유체의 온도는 350°C로 설정하였다.

5.1 Mesh model

유동 해석을 위해 생성된 Mesh 모델은 그림 3과 같으며, 평균 사이즈는 5mm 내외로 설정하였다.

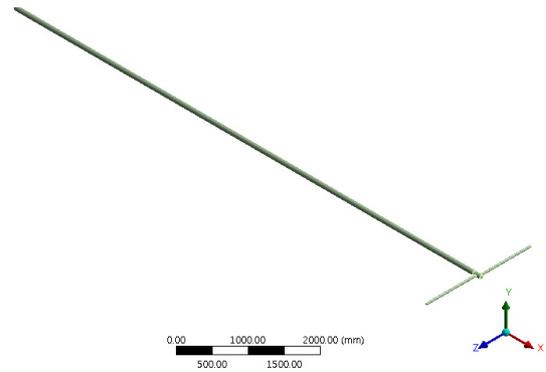


그림 2 해석 모델
 Fig. 2 Analysis mode

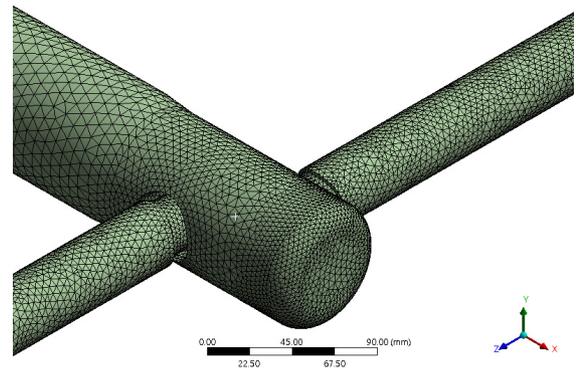


그림 3 Mesh 모델
 Fig. 3 Mesh model

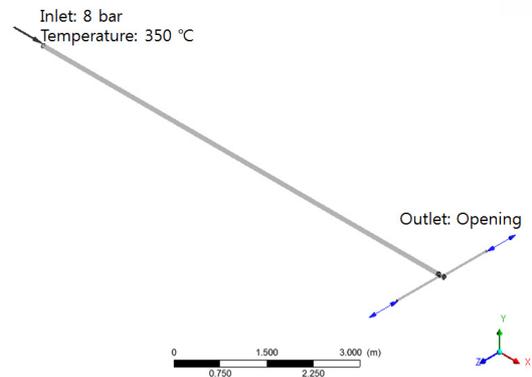


그림 4 경계조건
 Fig. 4 Boundary Condition

5.2 경계 조건

그림 4와 같이 입구 압력은 8bar, 증기의 온도는 350°C로 설정하였으며, Nozzle의 토출구는 Opening 조건을 적용하였다.

5.3 실험 계획법에 따른 해석 결과 및 파라미터 분석

표 3은 직교 배열표에 따른 Lance Tube의 유동 해석 결과이다. 이를 바탕으로 평균분석을 수행하여 파라미터에 따른 영향력을 분석하였다.

표 3 실험결과

Table 3 Experimental result

	Input mass (kg/s)	Output mass (kg/s)	Mass ratio (%)	Pressure (bar)
CASE 1	3.826	-1.003	26.23	1.904
CASE 2	3.814	-0.890	23.35	1.510
CASE 3	4.311	-0.964	22.35	1.911
CASE 4	3.936	-1.397	35.51	1.869
CASE 5	4.374	-1.421	32.49	1.955
CASE 6	3.945	-1.512	38.32	1.986
CASE 7	4.027	-1.720	42.72	1.788
CASE 8	4.042	-2.003	49.54	1.957
CASE 9	4.031	-1.838	45.60	1.862

표 4 유량비에 대한 평균 영향력

Table 4 Mean effect response for mass ratio

Level	Diameter (mm)	Distance (mm)	Angle (deg)	Gap (mm)
1	23.98	34.82	38.03	34.77
2	35.44	35.13	34.82	34.8
3	45.95	35.42	32.52	35.8
Delta	21.98	0.61	5.51	1.03
Rank	1	4	2	3

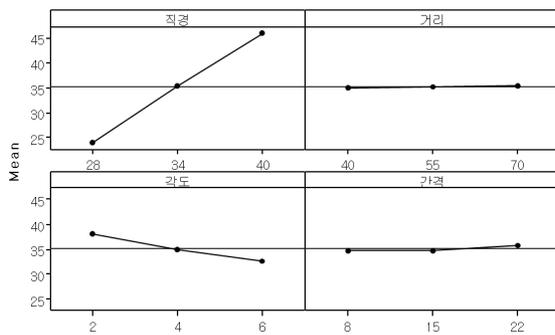


그림 5 유량비에 대한 평균 영향력 그래프

Fig. 5 Mean effect response graph for mass ratio

5.3.1 평균 분석

설계 파라미터의 영향력을 분석하기 위해 평균 분석을 수행하였다. 표 4, 표 5는 직교배열 실험에서 계산된 유량비와 최대 압

표 5 압력에 대한 평균 영향력

Table 5 Mean effect response for pressure

Level	Diameter (mm)	Distance (mm)	Angle (deg)	Gap (mm)
1	1.775	1.854	1.949	1.907
2	1.937	1.807	1.747	1.761
3	1.869	1.92	1.885	1.912
Delta	0.162	0.112	0.202	0.151
Rank	2	4	1	3

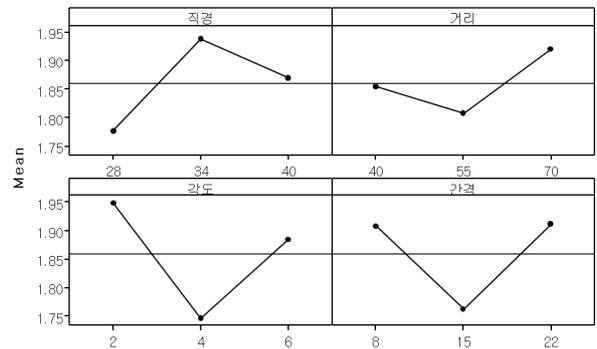


그림 6 압력에 대한 평균 영향력 그래프

Fig. 6 Mean effect response graph for pressure

력으로부터 설계 파라미터들의 수준별 평균을 계산한 평균분석의 결과이다. 유량비에 대한 평균분석에서 수준별 평균의 최대차이(Δ)가 크게 나타나는 직경, 각도, 간격, 거리의 순서로 수준 변화에 따라 영향력이 큰 것으로 평가되었으며, 특히 직경의 영향력이 매우 크게 나타났다. 그림 5, 그림 6은 설계 파라미터들의 수준별 평균값을 그래프로 표시한 것이다. 거리와 간격은 유량비에 대한 영향력이 미미한 것을 알 수 있으며, 최대 압력은 그 경향이 비선형성을 가짐을 알 수 있다. 따라서 Nozzle 형상은 직경이 크고, 거리가 멀수록, 각도는 작을수록 유량과 최대 압력이 높아질 것을 예상할 수 있다.

6. 회색 관계 이론을 적용한 Nozzle 형상 최적화

본 연구에서는 Nozzle의 형상 파라미터를 선정하기 위해 회색 상관관계 분석을 실시하였다. Lance Tube의 유량비와 압력 모두 방대특성을 가지는 것으로 가정하였다. 회색 상관 분석의 첫 번째 단계로 손실함수의 특성에 맞도록 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 S/N비로 변환하였다. 두 번째 단계로 변환된 S/N비를 이용하여 식 (3)~식 (5)에 따라 정규화를 하였으며, 그 결과를 표 6에 나타내었다.

세 번째 단계로 정규화된 S/N비를 이용하여 식 (6)에 따라 회색 상관 계수를 계산하였다. 회색 상관계수 계산 시 필요한 구별 계수(λ)는 1계 0으로 설정하였다. 네 번째 단계로 식 (7)에 따라

표 6 S/N비에 대한 실험결과

Table 6 S/N ratio for experiment

	S/N Ratio		Normalized S/N Ratio	
	Mass ratio	Pressure	Mass ratio	Pressure
CASE 1	28.38	5.59	0.2011	0.8461
CASE 2	27.37	3.58	0.0550	0.0000
CASE 3	26.99	5.63	0.0000	0.8595
CASE 4	31.01	5.43	0.5817	0.7784
CASE 5	30.23	5.82	0.4700	0.9426
CASE 6	31.67	5.96	0.6774	1.0000
CASE 7	32.61	5.05	0.8139	0.6167
CASE 8	33.90	5.83	1.0000	0.9463
CASE 9	33.18	5.40	0.8959	0.7647

표 7 회색 상관 계수와 회색 관계 등급

Table 7 Grey relational coefficient and grey relational grade

	Grey relational coefficient		Grey relational grade (G_i)
	Mass ratio	Pressure	
CASE 1	0.5559	0.8666	0.7113
CASE 2	0.5141	0.5000	0.5071
CASE 3	0.5000	0.8768	0.6884
CASE 4	0.7051	0.8186	0.7618
CASE 5	0.6536	0.9457	0.7997
CASE 6	0.7561	1.0000	0.8780
CASE 7	0.8431	0.7229	0.7830
CASE 8	1.0000	0.9491	0.9745
CASE 9	0.9057	0.8095	0.8576

표 8 회색 관계 등급에 대한 평균 영향력

Table 8 Mean effect response for grey relational grade

Level	Diameter	Distance	Angle	Gap
1	0.6356	0.7520	0.8546	0.7895
2	0.8132	0.7604	0.7088	0.7227
3	0.8717	0.8080	0.7570	0.8083
Delta	0.2361	0.056	0.1458	0.0856
Rank	1	4	2	3

회색 관계 등급을 계산한다. 표 7은 회색 상관 계수와 회색 관계 등급을 계산한 결과이다.

마지막 단계로 회색 관계 등급을 이용하여 평균 분석을 실시하여 최적 파라미터를 선정하였으며, 표 8은 평균 분석 결과를 나타낸 표이다.

평균 분석 결과를 바탕으로 결정된 Lance Tube Nozzle의 형상 파라미터는 표 9와 같으며, 그 형상은 그림 7과 같다.

표 9 Lance Tube Nozzle에 대한 형상 파라미터의 범위

Table 9 Level of shape parameters for Lance Tube Nozzle

Design Parameter	Unit	Selected parameters
Diameter	mm	40
Distance	mm	70
Angle	deg	2
Gap	mm	22

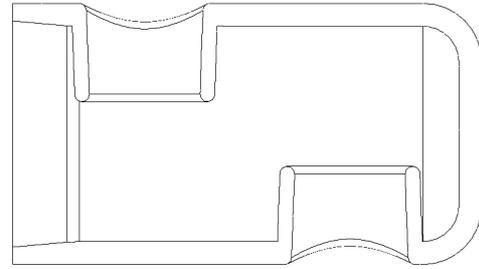


그림 7 최적화된 노즐 형상

Fig. 7 Optimized nozzle shape

7. 결 론

본 연구에서는 Lance Tube의 Nozzle 형상에 대해 다구치 실험 계획법과 회색 이론을 이용하여 최적화를 수행하였다. 최적화 수행을 위한 Lance Tube Nozzle의 주요 형상 파라미터를 선정하였으며, 실험 계획과 최적화를 위한 파라미터의 수준과 범위 그리고 목적 함수를 선정하였다.

선정된 파라미터와 수준을 이용하여 실험 계획에 따른 직교 배열표를 구성하고, 이에 따른 유동 해석을 수행하였다. 해석 결과를 토대로 다목적 최적화를 위한 회색 관계 분석을 실시하여 회색 관계 등급을 계산하였다. 여기서 계산된 회색 관계 등급을 이용하여 평균 분석을 실시하고, 이를 바탕으로 최적화된 배출량과 압력을 유지할 수 있는 최적의 Nozzle 형상을 선정하고 제안하는 논문이다.

감사의 글

이 논문은 2015학년도 한국국제대학교 교내연구비의 지원에 의하여 이루어진 것임.

8. 참고문헌

- [1] EPRI, Slagging and Fouling in Pulverized Coal-Fired Utility Boilers, Vol. I Final Report, 1987.

[2] S H Kim, H W Jung, S K Yook, "A Study on Optimal Operation for Soot Blower of Power Plant", The Korean Institute of Electrical Engineers, 11, pp. 541-543, 2004.

[3] Sondreal, E. A., Tufte, P. H. and Beckering, W., Ash Fouling in the Combustion of Low rank Western U. S. Coals, Combust. Sci. and Tech., Vol. 16, pp. 95-110, 1977.

[4] u, H.H., "The Introduction of Grey Analysis", Gauli Publishing Co., Taipei, 1996.

[5] Chiang, K.S., "The Introduction of Grey Theory", Gauli Publishing Co., Taipei, 1997.

[6] Lin, C.L., Lin, J.L. and Ko, T.C., "Optimization of EDM Process Based on the Orthogonal Array with Fuzzy Logic and Grey Relational Analysis Method", Int. J. of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 19, pp. 271-277, UK., 2002.

[7] K. Krishnaiah, P. Shahabudeen, "Applied Design of Experiments and Taguchi Method", PHI Learning Private Limited, New Delhi, 2012.



이 상 범 (Sangbeom Lee)

1977년 6월 6일생. 2003년 부산대 조선해양공학과 졸업. 2007년 동 대학원 조선해양공학과 졸업(석사). 2013년 동 대학원 조선해양공학과 졸업(공학박사). 2015년~현재 한국국제대학교 조교수.
Tel : 055-751-8244
E-mail : lsb7766@gmail.com



임 진 택 (Jintaek Lim)

1985년 8월 1일생. 2011년 경상대 전기공학과 졸업. 2013년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2016년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2015년~현재 한국국제대학교 조교수.
Tel : 055-751-7905
E-mail : jtl31223@naver.com
ORCID ID : 0000-0001-5192-0825

저 자 소 개



정 일 갑 (Ilkab Jeong)

1979년 6월 22일생. 2005년 동의대 기계공학과 졸업. 2019년 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 2010~2011년 LG전자 에어컨 사업부 근무. 2011~현재 ㈜석진이엔티 부설연구소 근무.
Tel : 051-203-8420
E-mail : kaby1031@nate.com



이 동 명 (Dongmyung Lee)

1979년 12월 20일생. 2004년 부산대 조선해양공학과 졸업. 2006년 동 대학원 조선해양공학과 졸업(석사). 2014년 동 대학원 조선해양공학과 졸업(공학박사). 2014년~현재 한국산업기술시험원 근무.
Tel : 055-759-3512
E-mail : dmlee1031@ktl.re.kr